

Сканирующая зондовая микроскопия в минералогических исследованиях

Е.А. Голубев, Н.Н. Пискунова

*Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, 167982 Сыктывкар, Россия
golubev@geo.komisc.ru*

Доклад посвящен особенностям применения методов СЗМ при изучении геологических объектов. Рассматриваются значимые результаты исследований и информативные для решения минералогических задач направления, для которых использование СЗМ является наиболее эффективным.

Scanning probe microscopy in mineralogical studies

Ye.A. Golubev, N.N. Piskunova

Institute of Geology of Komi SC of Ural Branch of RAS, 167982, Syktyvkar, Russia

The report shows the features of application of SPM for study of geological objects. Research results and topics that are informative for decision of mineralogical problems, for which use of SPM is most effective, are considered.

Изучение минеральных поверхностей методами СЗМ началось около двадцати пяти лет назад, что является довольно поздним по отношению к применению этих методов в других естественнонаучных дисциплинах, и интенсивность исследований росла достаточно медленно. К 2001 году сделавшим обзор англоязычной литературы С. Холлу и Д. Бозбаху [1] удалось обнаружить не более семидесяти публикаций по этой тематике. В России к тому времени было опубликовано около десятка работ, связанных с минералогическим применением СЗМ, что существенно меньше, чем для таких областей, как физика, химия, биология. Такая задержка связана, прежде всего, со специфическими затруднениями при подготовке геологических образцов [1-3], сдерживающим эффектом преимущественно сложного химического состава минералогических объектов и связанной с ним неопределенностью при интерпретации получаемых данных.

С помощью СЗМ наблюдались, например, наноразмерные структурные элементы и включения в минералах и рентгеноаморфных минеральных веществах, глинистые частицы в растворах, природные гели в естественной среде [1, 2]. Существенный импульс минералогическим СЗМ-исследованиям придало развитие атомно-силовой микроскопии. Центральную роль АСМ играет при решении задач, касающихся процессов растворения, осаждения и роста минералов (обзоры литературы приведены в [3, 4]). Особенности СЗМ, отличающие ее от «традиционных» в минералогической практике оптической и электронной микроскопии: трехмерность изображений; возможность работать в газовой и жидкой средах; высокое разрешение, особенно по нормали к поверхности на химически однородных поверхностях; позволили наблюдать и анализировать элементы структуры поверхности и процессы минералообразования, которые еще недавно являлись предметом теоретического анализа. Это, в частности, моноатомные ступени в динамике роста и растворения поверхностей минералов, взаимодействие растущих ступеней с препятствиями. Исследование особенностей роста кристаллов *in situ* наблюдением динамики граней в микро- и нанодиапазоне размеров позволяет решать многие задачи генетической интерпретации поверхности минералов (Рис. 1а,б). Сейчас с помощью АСМ изучаются процессы, связанные с формированием центров роста, образованием дефектов, захватом примесей, взаимодействием и эволюцией ступеней роста [4].

Высокую информативность методы СЗМ демонстрируют при исследованиях субмикро- и нанометрового структурирования природных некристаллических веществ. Систематическое исследование надструктурных особенностей природных твердых метакolloидов различного состава и генезиса позволило определить типы

надмолекулярных структур, провести качественную и количественную оценки надмолекулярной упорядоченности [2]. Особенно эффективным оказалось применение методов СЗМ для изучения наноразмерного строения органических минералов и минералоидов [2]. Перспективным направлением является высоколокальное изучение физических и химических свойств поверхности минералов [3]. В частности, изучение распределения проводящих и непроводящих фаз в углеродсодержащих породах с наноразмерной дисперсностью методами сопротивления растекания и электросиловой спектроскопии способствовало уточнению структурных особенностей природного наноструктурированного углерода [5], и позволило выявить на топографически гладких поверхностях природного графита (Рис. 1с,d) дефекты ориентационно-упорядоченной дислокационной сети с размерами дислокационных областей, существенно большими, чем у синтетических графитов [6].

Таким образом, можно выделить следующие направления, СЗМ-исследования в рамках которых позволили добиться значительного прогресса в ряде областей минералогического знания:

- *in-situ* наблюдения поверхности растущих и растворяющихся кристаллов в растворах в условиях, моделирующих природное минералообразование;
- визуализация поверхности вещественно-однородных минеральных веществ и атомно-молекулярной структуры поверхности минералов;
- высокоразрешающие исследования строения существенно метастабильных минералогических объектов в условиях, близких к их естественной геологической среде.

Комбинирование зондовых микроскопов с различными аналитическими приборами, дающими возможность собирать высоколокальную информацию о химическом составе поверхности, а также расширение возможностей модуляционных режимов, позволяющих различать атомы разной химической природы, создают перспективу значительного расширения областей применения СЗМ в минералогических исследованиях.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 15-05-04369).

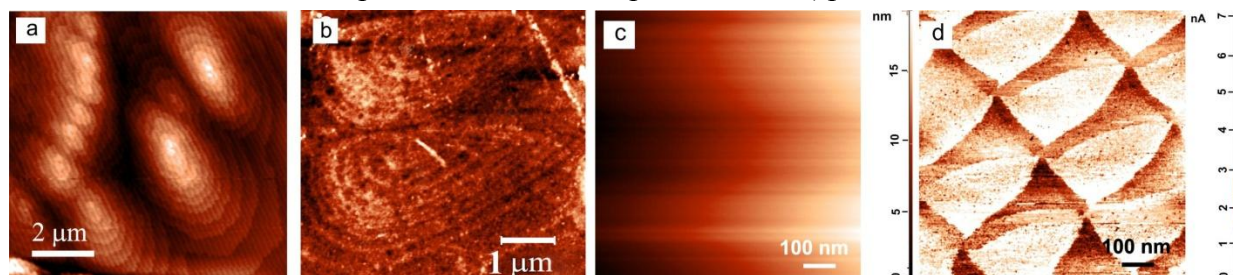


Рисунок 1. (a) *in-situ* наблюдение конкуренции дислокационных холмиков на поверхности диоксида (высота ступеней 0.8 nm); (b) дислокационные холмики роста на поверхности кварца (Приполярный Урал); (c) топография поверхности и (d) – сопротивление растекания на участке с развитой дислокационной сетью у природного графита (Кумдыкольское м-ие) [6].

1. C. Hall, D. Bosbach, *Materials Science of concrete IV* (Eds. J. Skalny, S. Mindness). The American Ceramic Society. 1–29 (2001).
2. Е.А. Голубев, *Надмолекулярные структуры природных рентгеноаморфных веществ*. Екатеринбург: УрО РАН. 155 (2006).
3. J. Jupille, *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. **78**, 331–369 (2014).
4. Н.Н. Пискунова, *Исследование процессов роста и растворения кристаллов с помощью атомно-силовой микроскопии*. Екатеринбург: УрО РАН. 133 (2007).
5. Е.А. Голубев *Физика твердого тела*. **55**, 995–1002 (2013).
6. T.G. Shumilova, Ye.A. Golubev, J. Mayer, S.S. Shevchuk, V.A. Radaev, S.I. Isaenko, S.N. Tkachev, *Carbon* **114**, 724–730 (2017).